'89 韓國自動制御學術會議論文集 1989. 10. 27~28

로보트 매니퓰레이터의 비집중 적응제어에 관한 연구
(A Study on Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulator)

° 이 상철* 박 성기** 정 찬수**
(S. C. Lee S. K. Park C. S. Chung)

* 대유공업전문대학 전기과 (DaeYeu Tech. Jr. College)
** 숭실대학교 전기공학과 (SoongSil Univ., Dept. of Elect. Eng.)

This paper presents on approach to the position control of a robot manipulator by using a decentralized adaptive control scheme. The large scale system is regarded as the system which consists of many subsystems having interconnection. In each subsystem, a local control system is composed by feedforward and feedback component, one computes the nominal torque from the Newton-Euler equation, the other computes the perturbation equation which reduce the position error of the manipulator along the nominal trajectory. A computer simulation studies was conducted to evaluate and compare the performances of the proposed manipulator control scheme with those of the PD control and centralized control schemes.

1. 서 론

로보트에 대한 산업현장에서의 수요증가와 더불어 고속동작 및 복잡한 작업수행이 요구됨에 따라, 로보트 매니퓰레이터의 제어방식도 여러 기법(Joint Motion Control, Resolved Motion Control, etc) 이 개발 되었다.[1][2][3] 그러나 위의 계산 기법은 로보트 매니퓰레이터의 비선형적인 구조때문에 위의 요구를 충족시키지 못하고 있으며, 이에따라 위의 단점을 보완한 적응제어기법이 개발되고있다.[4][5]

적응제어 중에서 집중 적응제어 기법은 모든 정보처리와 계산이 한 장소에서 집중적으로 이루어짐을 전제로 하였기 때문에 시스템 규모가 커지면 집중적 정보수집이 비 경제적이고 불가능하게 된다.

본 연구에서는 위 시스템을 차원이 낮은 부시스템으로 모델링하고, 각 부시스템에서 분산처리를 하면서 전체시스템이 안정하도록 하는 경제적이고 신뢰성있는 비집중 제어기법을 고찰하고자 한다.

2. 매니퓰레이터의 동적모델

매니퓰레이터의 동적방정식은 관절 입력 토오크와 운동 과의 관계식으로 동적 특성을 나타내는 데에는 Lagrange의 방법이 바람직하다. 이 방법을 적용 하였을때, 관절공간에서의 n개의 관절에대한 Lagrange의 운동방정식은 다음과 같이 표현될수 있다.[6]

$$D(\theta)\ddot{\theta}(t)+h(\theta,\dot{\theta})+G(\theta) = \tau(t) \qquad (1)$$

여기서 $\tau(t)$는 (nx1)인 입력토오크벡터, $D(\theta)$는 (nxn)관성행렬, $h(\theta,\dot{\theta})$는 (nx1)의 비선형 Coriolis와 원심력벡터, $G(\theta)$는 (nx1)의 중력벡터, $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$는 각위치, 각속도, 각가속도 벡터이다.

식(1)의 운동 방정식에서 매니퓰레이터의 2n 차원 상태벡터를 $x(t)=(\theta(t),\dot{\theta}(t))=(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n,\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\ldots\dot{\theta}_n)$, n차원의 입력벡터를 $u(t)=(\tau_1(t),\tau_2(t),\ldots,\tau_n(t))$ 로 하여 상태벡터로 정의 하면 다음과 같다.[7]

$$\dot{x}(t) = f(x(t),u(t)) \qquad (2)$$

여기서 $f(\cdot)$는 (2nx1)인 연속미분가능한 벡터함수이다. 식(2)의 시스템에 대한 공칭상태를 $x_n(t)$, 공칭 입력을 $u_n(t)$로 하면, 공칭 상태벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{x}_n(t) = f(x_n(t),u_n(t)) \qquad (3)$$

공칭궤적에 대해 식(2)를 Taylor급수로 전개하고, 고차항을 무시하면, 이 제어 시스템은 다음과 같은

선형화 섭동방정식으로 표시된다.

$$\delta\dot{x}(t) = A(t)\,\delta x(t)+B(t)\,\delta u(t) \qquad (4)$$

여기서, $\delta x(t) = x(t)-x_n(t)$, $\delta u(t) = u(t)-u_n(t)$ 이고, A(t)와 B(t)는 공칭상태와 공칭입력에서 계산되는 f(·)의 Jacobian 행렬로서 다음과 같다.

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0_N & I_N \\ A^* & \end{bmatrix} \qquad B(t) = \begin{bmatrix} 0_N \\ B^* \end{bmatrix} \qquad (5)$$

식 (5) 에서 링크와 부하의 매개변수들이 제어측 갱신(update)속도에 비해 천천히 변한다고 가정하면 이들 매개 계수들은 상수로 간주할수 있다.[8]

그러면 식(4)는 다음과 같다.

$$\delta\dot{x}(t) = A\,\delta x(t)+B\,\delta u(t) \qquad (6)$$

3. 비집중 적응 제어 기법

N 개의 부시스템을 가지고있는 대규모 선형시불변 시스템을 다음과 같이 표시하자.

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t)+B_i u_i(t)+\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} A_{ij} x_j(t) \qquad (7)$$

여기서 x_i(nx1)는 i번째 부시스템의 상태, u_i(mx1)는 이때의 입력, A_i, B_i와 A_{ij}는 같은 차수의 상수 행렬 이다. 전체 시스템에서 상태 $x(t) = (x^T_1(t), x^T_2(t),\ldots,x^T_n(t))$, 입력 $u(t) = (u_1(t),u_2(t),\ldots, u_n(t))^T$ 이고, (nxn) 행렬 A_i와 (nx1) 행렬 B_i는 다음과 같이 가제어 표준형으로 주어진다.[9]

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ a^i_1 & a^i_2 & \cdots & a^i_{ni} \end{bmatrix} \qquad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (8)$$

n_i x n_j 행렬 A_{ij} 는

$$a^{pq}_{ij} \leq \mu_{ij} \qquad p < q \qquad (9)$$

으로 $p=1,2,\ldots,n_i$, $q=1,2,\ldots,n_j$ 이다.

가정 1

a^{pq}_{ij}는 A_{ij}의 pq 번째 요소로서 μ_{ij}는 기지의 상수이다. 또한 이때 계수값은 미지이나 경계값은 알고있는 것으로 하자.

본 연구는 각 부시스템에서 상태 $x_i(t)$가 0 이 되도록하여 전체시스템이 점근적인 안정이되도록 하는 것이다. 이를위해 $\{A^m_i, B^m_i\}$, (i=1,2,...,N)가 기준 모델의 가제어 행렬쌍이라 하자. 식(7)을 다시쓰면

$$\dot{x}_i(t) = A^m_i x_i(t)+B^m_i u_i(t)+(A_i-A^m_i)x_i(t) +(B_i-B^m_i)u_i(t)+\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} A_{ij} x_j(t) \qquad (10)$$

시스템 (10) 을 제어하기 위해 다음과 같은 local 제어기를 구성한다.

$$u_i(t) = -(F_i(t)+K_i)x_i(t)-G_i(t)u_i(t) \qquad (11)$$

여기서 $F_i(t)$와 $G_i(t)$는 매개변수 적응법칙이고, K_i는 다음 관계를 만족하는 상수행렬이다. 즉,

$$K_i = B^{mT}_i P_i \qquad (12)$$

식(12)의 대칭 정치행렬 P_i는 대칭 정치행렬 Q_i와 상수 α_i 에 대해 다음과 같은 Riccati 방정식의 해이다.[10]

$$(A^m_i+\alpha_i I_{ni})^T P_i+P_i(A^m_i+\alpha_i I_{ni})-P_i B^m_i B^{mT}_i P_i+Q_i = 0 \qquad (13)$$

local 적응제어기 (11) 을 시스템 (10) 에 가하면 폐루우프 시스템은

$$\dot{x}_i(t)=(A^m_i-B^m_i K_i)x_i(t)+(A_i-A^m_i-B^m_i F_i(t))x_i(t) +(B_i-B^m_i-B^m_i G_i(t))u_i(t)+\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} A_{ij} x_j(t) \qquad (14)$$

위에서 $(A^m_i-B^m_i K_i)$ 는 α_i 의 안정도를 가지는 안정행렬이다.

가정 2

다음 관계를 만족하는 상수행렬 F^*_i와 G^*_i가 존재한다고 하자.

$$\begin{cases} A_i-A^m_i = B^m_i F^*_i \\ B_i-B^m_i = B^m_i G^*_i \end{cases} \qquad (15)$$

위의 가정 2 에서 행렬 $(A_i-A^m_i)$과 $(B_i-B^m_i)$의 벡터가 행렬 B^m_i의 행벡터에 선형 종속이 됨을 알수있다. Lyapunov 안정 이론에 입각해 다음과 같은 매개변수 적응법칙을 제안한다.

$$\begin{cases} \dot{F}_i(t) = \Gamma_{1i} K_i x_i(t) x^T_i(t) \\ \dot{G}_i(t) = \Gamma_{2i} K_i x_i(t) u^T_i(t) \end{cases} \qquad (16)$$

여기서, Γ_{1i}, Γ_{2i} 는 대칭이고 정치인 적응이득 행렬 이다. 식 (15)의 정합조건을 이용하여 폐루프

시스템을 구하면

$$\dot{x}_i(t)=(A^m_i-B^m_iK_i)x_i(t)+B^m_i(F^*_i-F_i(t))x_i(t)+B^m_i(G^*_i-G_i(t))u_i(t)+\sum_{j=1}^{N}A_{ij}x_j(t)\quad j=1,2,\ldots,N \quad (17)$$

이 되고, 이때 전체시스템의 안정은 다음의 정리를 통해 보장된다.

정리

대칭행렬 L의 ij번째 요소 ℓ_{ij}가 부의 값(-)이 되도록 차수 N인 α_i,(i=1,2,...,N)를 선정한다면 식(17)의 폐루우프 시스템은 안정하다. 즉,

$$\ell_{ij}=\begin{cases}-\lambda_m[D_i+2\alpha_iP_i]/\lambda_M(P_i) & ; \ i=j\\ \|A_{ij}\|+\|A_{ji}\| & ; \ i\neq j\end{cases} \quad (18)$$

여기서 P_i는 식(13)의 해이고, D_i는 다음과 같다.

$$D_i = Q_i+P_iB^m_iB^{mT}_iP_i \quad (19)$$

증명) $\Delta F_i(t)$와 $\Delta G_i(t)$가

$$\begin{cases}\Delta F_i(t) = F_i(t)-F^*_i\\ \Delta G_i(t) = G_i(t)-G^*_i\end{cases} \quad (20)$$

라하자. 정합조건(15)를 이용하면 폐루우프시스템은

$$\dot{x}_i(t)=(A_i-B_iK_i)x_i(t)-B^m_i\Delta F_i(t)x_i(t)-B^m_i\Delta G_i(t)u_i(t)+\sum_{j=1}^{N}A_{ij}x_j(t) \quad (21)$$

이된다. 또한 Lyapunov함수를 다음과같이 선정한다.

$$V(t)=\sum\{x^T_i(t)P_ix_i(t)+Tr(\Delta F^T_i(t)\Gamma^{-1}_{1i}\Delta F_i(t))+Tr(\Delta G^T_i(t)\Gamma^{-1}_{2i}\Delta G_i(t))\} \quad (22)$$

시간 t 에 대하여 미분하면

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}[2Tr\{\Gamma^{-1}_{1i}\Delta\dot{F}_i(t)-K_ix_i(t)x^T_i(t)\}^T\Delta F_i(t)]+2Tr\{(\Gamma^{-1}_{2i}\Delta\dot{G}_i(t)-K_ix_i(t)u^T_i(t))^T\Delta G_i(t)\}-x^T_i(t)[D_i+2\alpha_iP_i]x_i(t)+2x^T_i(t)P_i\sum_{j=1}^{N}A_{ij}x_j(t) \quad (23)$$

$\dot{V}(t)$를 계산하기위해 적응법칙(16)을 이용하면

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}\{-x^T_i(t)[D_i+2\alpha_iP_i]x^T_i(t)\}+2x_i(t)P_i\sum_{j=1}^{N}A_{ij}x_j(t) \quad (24)$$

이 식을 정리하면

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}\{-\lambda_m[P_i+2\alpha_iP_i]\|x_i(t)\|\}+2\lambda_M[P_i]\|x_i\|\sum_{j=1}^{N}\|A_{ij}\|_{UB}\|x^T_j(t)\|$$
$$=\lambda_M[P_N]x^T(t)Lx(t) \quad (25)$$

여기서, α_i (i=1,2,...,N)가 증가할때 각 i 에서 L 이 정치값이 될수 있는 α_i 를 선정한다면

$$\dot{V}(t) < 0 \quad (26)$$

가 된다. 즉, 위 시스템은 점근 안정이 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과

본 연구의 시뮬레이션은 두개의 링크를 가진 로보트 매니퓰레이터 (그림1)에 비집중 적응 제어기법을 적용시키기 위해 각 링크를 하나의 부 시스템으로 하여 그림 2 와 같이 제어시스템을 구성 하였다. 이때 공칭제어는 Newton-Euler방정식으로, 미소제어는 섭동방정식을 이용한 적응제어기법 으로 구하였다.

비집중 제어기법의 성능을 평가하기 위해 PD 제어기법[2]과 집중 적응제어기법[12]을 비교해 보았다.

이때 PD제어기법의 제어기의 구조는 다음과 같다.

$$\tau(t)=D(q(t))\{\ddot{q}^n(t)+K_v(\dot{q}^n(t)-\dot{q}(t))+K_p(q^n(t)-q(t))\}+h(q(t),\dot{q}(t))+G(t) \quad (27)$$

여기서 K_v와 K_p는 속도 및 위치궤환 이득행렬로서 각각 diag(100,200)과 diag(150,300)로 설정하였다.

집중 제어기의 설계변수는

$$A^m=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ -25000 & 0 & -180 & 0\\ 0 & -25000 & 0 & -180\end{bmatrix}\quad B^m=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\\ 1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

$\Gamma_1 = 1 \qquad \Gamma_2 = 0.1 \qquad Q = 1000I_4$

비집중 제어기의 설계변수로는

$$A^m_1=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -10000 & -100\end{bmatrix}\quad B^m_1=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$$

$$A^m_2=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -30000 & -100\end{bmatrix}\quad B^m_2=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$$

$\alpha_1 = 5 \qquad \alpha_2 = 10 \qquad \mu_{12} = \mu_{21} = 0.4$

$Q_1 = 1000I_2 \qquad Q_2 = 1500I_2$

$\Gamma_{i1} = 1 \qquad \Gamma_{i2} = 0.1$

으로 하였다.

매니퓰레이터의 원하는 경로는 Cubic Polynomial 기법[13]을 사용하여 시작점(0° ,0°)에서 도착점(50° ,50°)까지 1 초동안에 제어하도록 하였다.

또한 각각의 부하상태를 검토해 보기위해 무부하, 정격부하, 최대부하로 시뮬레이션을 했다.

그림 3 - 5 는 정격부하 에서의 각 제어기법별 토오크이고, 그림 6 - 8 은 위치오차이다.

위 결과에서 보면 PD 제어기법(그림 3, 6)은 토오크의 진동이 거의 없고 완만히 변하지만, 제어구간 내에서 위치오차의 수렴속도가 느리며 이때의 크기는 0.002(deg) 정도이다. 또한 제어구간 이후에도 오차가 완만히 감소 하였다. 집중 적응제어 기법(그림 4, 7)은 PD 에 비해 토오크의 진동은 심하지만, 위치오차의 크기는 작으며 수렴 속도도 매우 빠르고 1.05(sec)에서 완전히 '0' 으로 수렴하였다. 비집중 적응 제어기법 (그림 5, 8)은 집중 적응제어 기법에 비해 토오크의 진동특성은 작으나, 위치오차는 3 - 4 배 정도 큰 것으로 나타나고 있으며 수렴속도는 1.5 - 1.6(sec) 정도에서 완전히 '0' 으로 수렴하여, 집중 적응제어 기법 보다 큰 오차와 늦은 수렴성을 보여주지만 제어구간 끝에서의 오차크기는 거의 같았고 PD 보다는 빠른 수렴성을 보여준다.

5. 결 론

본 연구는 비집중 적응제어 기법을 이용한 두개의 링크를 갖는 로보트 매니퓰레이터의 경로제어에 관한 연구로 토오크와 위치오차에 대해 고찰하였다.

비집중 제어기법은 PD 제어기법 보다는 빠른 수렴성을 가지고 있고, 모든 제어정보가 하나의 제어기에 집약되어 있는 집중제어 기법에 비해서는 계산량의 감소로 실시간 제어가 더욱 용이하기 때문에 실제의 로보트 시스템에서는 비집중 제어기법이 더 적합하리라 사료된다. 두개 이상의 링크를 가진 경우와 상호 결합항의 영향을 감소시킬수 있는 기법이 앞으로의 연구과제 이다.

참 고 문 헌

[1] R. P. Paul "Manipulator Cartesion Path Control" IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber., Vol SMC-9, 1979, pp702-711

[2] J. Y. S Luh., M. W. Walker, P. R. Paul "Resolved-Acceleration Cntrol of Mechanical Manipulator" IEEE Trans. on Auto. Cont., Vol. AC-25, 1980, pp468-474

[3] W. H. Chi and P. R. Paul "Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator" IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber., Vol SMC-12, 1982, pp266-275

[4] G. S. G. Lee and M. J. Chung "An Adaptive Control Strategy for Mechanical Manipulators" IEEE Trans. on Auto. Cont., Vol AC-29, No 9, 1984, pp837-840

[5] S. Dubowsky and D. T. DesForges "The Application of Model Reference Adaptive Control to Robotic Manipulators" IEEE Trans. on ASME J. Vol 101, 1979, pp193-200

[6] J. M. Hollerbach "A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity" IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber., Vol SMC-10, No 11, 1980, pp730-736

[7] M. E. Kahn and B.Roth "The Near-Mininum Time Control of Open-loop Articulated Kinematic Chain" IEEE Trans. ASME. J., Vol 93, 1971, pp164-172

[8] A. J. Koivo and T. H. Guo "Adaptive linear controller for Robotic Manipulator" IEEE Trans.on Auto. cont., Vol-28, 1983, pp. 162-171

[9] D. J. Gavel and D.D. Siljak. "Decentralized Adaptive control; Structural Condition for Stability." IEEE Trans. on Auto. Cont. Vol 34. 1989. pp 413-426.

[10] P. K. Sinha, "Multivariable Control an Introduction" Marcel-Dekker. 1984.

[11] K. S. Fu, R.C, Gonzalez, C. S. G. Lee "Robotics control, sensing, vision, and intelligence" McGRAW Hill. 1986.

[12] Y. K. Choi. "A study on Adaptive Control Schemes Applicable for Robot Manipulator." Ph. D., Thesis, KAIST, Feb 1987.

[13] J. J. Craig "Introduction Robotics Mechanical & control" Addison-Wesley. 1986. pp194 - 202

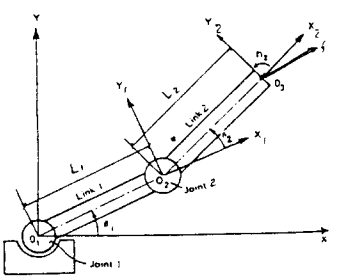

그림 1. 2-LINK 매니퓰레이터

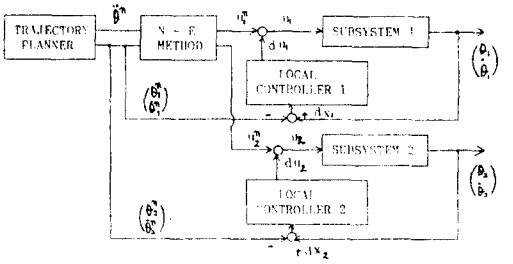

그림 2. 블럭 다이어그램

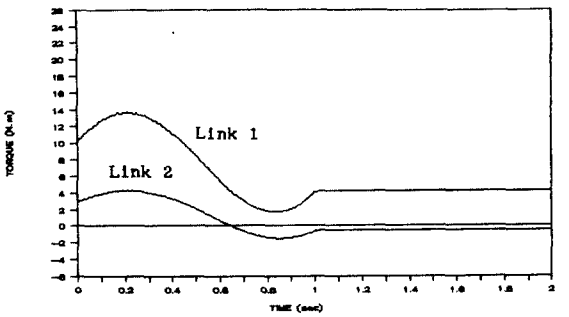

그림 3. 정격부하시 PD 제어기법의 토오크

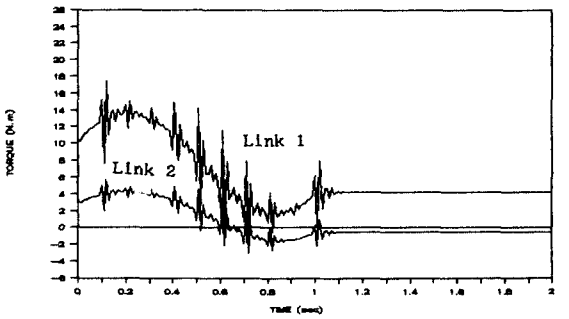

그림 4. 정격부하시 집중적응 제어기법의 토오크

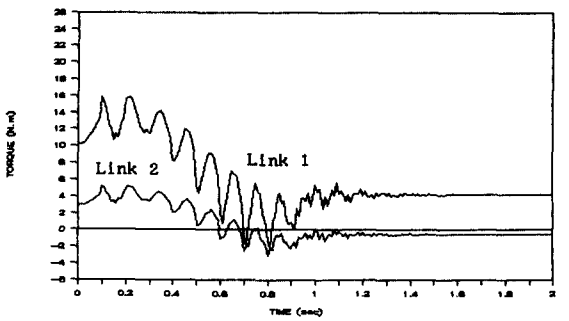

그림 5. 정격부하시 비집중 적응제어기법의 토오크

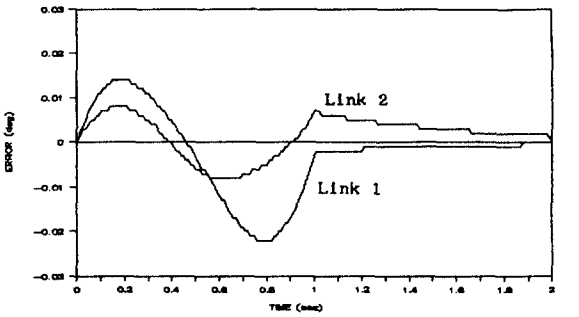

그림 6. 정격부하시 PD 제어기법의 위치오차

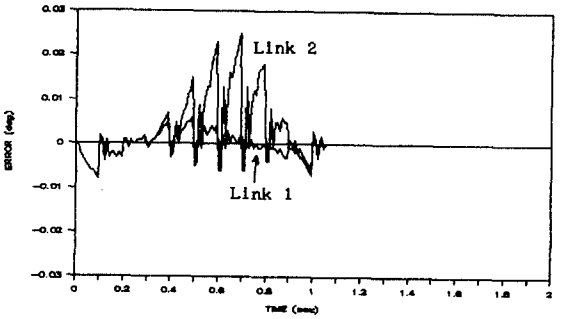

그림 7. 정격부하시 집중적응 제어기법의 위치오차

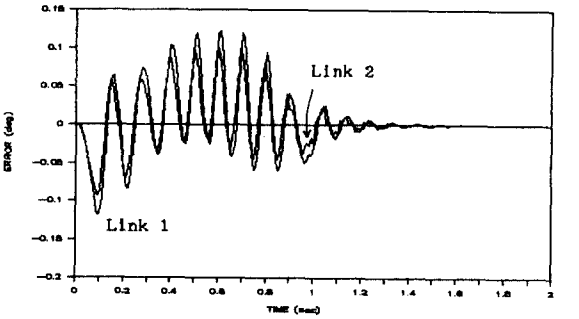

그림 8. 정격부하시 비집중 적응제어기법의 위치오차